《心理学报》论文自检报告

请作者填写以下内容，粘贴在稿件的首页。

1. 请以“研究亮点”的形式列出最多三条本研究的创新性贡献(必须有理论贡献)，总共不超过200字。

《心理学报》的目标是发表“既科学优秀，又具有广泛兴趣和意义” (be both scientifically excellent and of particularly broad interest and significance)的心理学前沿研究。如果您的研究只有小修小补的贡献，没有尝试开创新的研究领域(new areas of inquiry)或提出独到见解和创新视角(unique and innovative perspectives)，特别纯粹只是研究没有明确心理学问题的算法或技术的工作，这类研究被本刊接受的机会小，建议另投他刊。

答：1）研究逻辑层层递进。为了验证目标和干扰物的定义维度（颜色或形状）对统计规则作用的影响，实验1重复了前人的结果，在实验2中通过设定反转证实了定义维度的关键作用，并在实验3中将该关键性问题进行解决。逻辑递进有序，层层深入。
2）理论贡献。本研究开创性地提出目标和干扰物的定义维度差异所带来的混淆，对以往研究的结果提出了挑战，为现有范式提供关键改进建议，并对统计规则作用的理论进行修订。
3）数据探索丰富。除了传统的统计规则作用差异比较外，还根据时间段的划分来深入考察对不同维度的统计规则学习的时间进程的差异。

2. 作者已经投稿或发表的文章中是否采用了与本研究相同的数据？如果是，请把文章附上审查。(我们不赞成作者用同一数据发表多篇变量相同的文章，也不赞成将一系列的相关研究拆成多个研究来发表的做法。)
答：否

3. 管理、临床、人格和社会等领域仅有自我报告(问卷法)的非实验非干预研究，需要检查数据是否存在共同方法偏差(common method bias)。为控制或证明这种偏差不会影响研究结论的效度，你使用了什么方法？采取了哪些措施？(共同方法偏差的有关文献可参见：http://journal.psych.ac.cn/xlkxjz/CN/abstract/abstract894.shtml)基于横断数据，仅有自我报告，仅仅在方便样本中施测，这样的研究数据易取得，但通常创新性价值不大，被本刊接受的机会小。
答：没有使用问卷法

4. 是否报告并分析了效果量(effect sizes；如：*t* 检验：Cohen’s *d*；方差分析：η^2 或 η_p^2；标准化回归系数)？(很多研究只是机械地报告了效果量，但没有做必要的分析或说明，如效果量是大中小？有什么理论意义或应用意义？)。(在 google 中搜索“effect size calculator”，可搜到许多计算方便的 APP。效应量的有关解释，中文可参考：http://journal.psych.ac.cn/xlkxjz/CN/abstract/abstract1150.shtml；英文可参看：http://www.uccs.edu/lbecker/effect-size.html
是否报告统计分析的 95% CI？(如，差异的 95% CI；相关/回归系数的 95% CI)置信区间的有关计算和绘图可参考 https://thenewstatistics.com/itns/esci/)
答：是

5. 请写出计划的样本量，实际的样本量。如果二者有差别，请写出理由。以往心理学研究中普遍存在样本量不足导致的低统计功效(power)问题，我们建议在论文的方法部分解释您计算及认定样本量的依据。应该以有一定依据的效果量(effect size)、期望的功效来确定样本量，并报告计算用软件或程序。样本量计划的理由和做法可参考 https://osf.io/5awp4/
答：在被试部分对计划的样本量和实际样本量进行了报告，三个实验的实际样本量均大于计划样本量。

6. 假设检验中，如果是零假设显著性检验(NHST)，需报告精确 *p* 值而不是 *p* 的区间(小于0.001 的报告区间，其他报告精确 *p* 值)。你的论文是否符合该项要求？如果是贝叶斯因素，是否已报告其对先验分布假定的敏感性？
答：符合

7. 为保证论文中数据报告的完备性，统计分析中如果剔除了部分数据，是否在文中报告？原因是什么？包含这部分数据的统计结果如何变化？统计分析中是如何处理缺失数据的？使用量表时是否删除了其中的个别题目？原因是什么？如果包含这部分题目，统计结果会如何变化？是否有测量的项目或者变量没有报告？原因是什么？请写出在论文中的位置。
答：在每个实验的结果部分报告了剔除的数据的依据（各条件三个标准差外）。

8. 研究用到的未经过同行评议和审查的实验材料、量表或问卷，是否附在文件的末尾以供审查？如果没有，请写出理由。如果该文发表，您是否愿意公开这些材料与其他研究者共享？
答：没有使用。

9. 本刊要求作者提供原始数据，请在以下 3 种里选择一种打√：

a) 投稿后将数据发至编辑部邮箱( )

b) 数据可以从如下链接中获得( )

c) 原始数据和程序已在心理科学数据银行(https://psych.scidb.cn/)上分享(√) https://www.scidb.cn/en/s/I7nI7r

d)如不能提供，请说明理由或提供有关证明。

10. 您的研究是否是临床干预或实验室实验？ 是( ) 否(√)
如果是，请提供预注册登记号 ______________________。
如果没有，请说明原因____。
注：临床干预或实验室实验，建议在收集数据前预注册(pre-register)。也鼓励其他实验研究预注册。预注册要求写出所有的研究假设及其支持，以及实验/干预的详细过程和步骤。本期刊的预注册网站是 https://os.psych.ac.cn/preregister (使用说明书见本刊网站"下载中心")或 https://osf.io/ 或 https://aspredicted.org/。如果您的研究有预注册，会显著增加被录用的机会。预注册的重要性可参考 https://osf.io/5awp4/

11. 您的研究如果用到了人类或动物被试，是否得到所在单位伦理委员会的批准？如果是，请把扫描版发至编辑部邮箱。如果否，请说明理由。
答：是，已发送邮箱

12. 是否依据编辑部网站发布的"英文摘要写作注意事项"撰写 400~500 个单词的英文大摘要？英文题目和摘要是否已请英语好的专业人士把关或者已送专业 SCI/SSCI 论文编辑公司修改润色？
答：是

13. 如果第一作者是学生，请导师单独给编辑部(xuebao@psych.ac.cn)发邮件，说明已阅读本文并认真把关。是否已提醒导师给编辑部发邮件？(编辑部收到导师邮件后才会考虑进入稿件处理流程)
答：第一作者非学生

14. 请到编辑部网站首页右侧"下载中心"下载并填写"稿件不涉密证明"，加盖通讯作者单位的保密办公章，把扫描件发至编辑部邮箱(xuebao@psych.ac.cn)。如没有保密办公章，请加盖通讯作者的单位公章。是否已发邮件？
答：已发送邮箱

颜色比形状更重要

——同维度定义的干扰物特征统计规则对注意选择的影响

摘 要 视觉搜索任务中，当干扰物的特征固定时，搜索效率会得到提高，即统计规则能够提高注意选择的表现。然而，以往研究中目标和干扰物的特征维度不统一，统计规则的作用中可能混淆了由不同维度所带来的注意引导差异。为了考察目标与干扰物的维度对统计规则作用的影响，实验 1 与以往研究相同，将目标定义为形状，干扰物定义为颜色；实验 2 则将两者的定义维度反转。结果发现，目标与干扰物定义维度本身的差异会干扰统计规则的作用。因此，实验 3 中将目标和干扰物的定义维度保持一致，同时考察形状和颜色两种维度的统计规则对注意选择的影响。结果发现：将维度统一后，无论是形状还是颜色维度，高概率干扰物出现时，对目标的反应时均显著快于低概率条件，证明了统计规则对注意选择的独立作用。更重要的是，颜色维度下，高概率与不呈现条件无显著差异，说明颜色维度的统计规则的抑制作用较强，干扰物不再捕获注意；而形状维度下，高概率条件的反应时更慢，说明形状维度的统计规则的抑制作用较少，仍有注意捕获。研究厘清了由刺激本身定义维度所带来的混淆，验证了视觉系统可以通过统计规则和搜索维度来优化认知资源的分配，从而提高搜索效率。

关键词 统计规则，注意选择，注意抑制，颜色，形状

1 引言

在日常生活中，每时每刻都有大量信息输入到我们的视觉系统。由于可用的认知资源有限（Broadbent, 1958；Lennie, 2003），我们必须选择与当前任务相关的信息，同时忽略可能干扰注意的无关信息。幸运的是，我们所处的环境并非杂乱无章，而往往具有一定的规则性。例如，课上的知识重点老师会多次强调，非重点则一带而过。于是某些知识会被高频提及的规则可以帮助个体迅速关注知识重点，从而高效学习。这种在环境中隐含的刺激呈现的规律信息即统计规则（statistical regularity）（张帆等，2021）。统计规则会影响对刺激的加工，刺激与空间位置信息或特征信息反复关联的过程中，刺激的注意投入（attentional deployments）发生改变，引发了持续性的选择偏差（selection biases），从而影响了对具有统计规则的目标的注意选择或干扰物的注意抑制（Failing & Theeuwes, 2018；Theeuwes, 2019）。因此，探讨统计规则对注意选择的影响，能够更好的阐释之前经验对当前注意的影响，也能够对如改善个体的注意力控制能力、设计更有效的教育环境、高效进行广告投放等具有指导意义。

注意受到干扰物统计规则的影响（Failing & Theeuwes, 2020；Ferrante et al., 2018；Wang & Theeuwes, 2018a, 2018b）。改变干扰物位置的统计规则，会影响被试的视觉搜索表现。例

如，Wang 和 Theeuwes （2018b）的实验中，要求被试搜索特定形状的刺激（菱形中搜索圆形），并忽略一个颜色独特的干扰物，该独特干扰物呈现在某一特定位置的概率是 65%（高概率位置），呈现在其他位置的概率为 35% （低概率位置）。结果发现，干扰物在高概率位置呈现时，被试的反应时显著变快。说明与其他位置相比，高概率位置的独特干扰物更容易被抑制。此外，除了位置，基于干扰物特征（如颜色、大小、形状等）的统计规则也会影响注意选择，个体能够学习这些干扰物的统计规则，减少其对搜索目标的干扰，提高注意选择效率（Failing et al., 2019；Stilwell et al., 2019；Vatterott et al., 2018；张帆等，2021）。例如，Stilwell 等（2019）采用经典的额外单例范式（additional singleton paradigm），要求被试搜索特定形状的刺激（如菱形中搜索圆形）并忽略一个颜色独特的干扰物，颜色独特的干扰物为某一特定颜色的概率是 65%（高概率颜色），为其他干扰物颜色的概率为 35%（低概率颜色）。结果发现，当干扰物为高概率颜色时，被试的反应更快。张帆等（2021）同样发现，当采用特征搜索模式（feature search mode）要求在多种形状中搜索目标时，被试对高概率颜色的独特干扰物的注意抑制更强。

然而，目标（形状）维度和独特干扰物（颜色）维度本身对注意的引导强度会产生差异，这种差异会对统计规则的作用产生混淆。以往研究中，多将目标定义为形状，而通过颜色操纵干扰物的统计规则 （Stilwell et al., 2019；Wang & Theeuwes, 2018b；Vatterott et al., 2018）。目标和干扰物的不同特征会产生注意引导差异。相比于目标的形状特征，颜色被认为对注意有"绝对引导属性（Undoubted Guiding Attributes）"（Wolfe & Horowitz, 2017）。不仅在注意选择中更具优势（Theeuwes, 1992；Treisman & Gelade, 1980），而且在加工顺序中对颜色的感知时间也更早（Clifford et al., 2003；Rentzeperis et al., 2014；White et al., 2014）。作为颜色维度的单例刺激，以往研究中的独特干扰物会对注意产生很强的引导性（Theeuwes, 1992；Bacon & Egeth, 1994）。因此，如果将目标定义为引导强度较高的颜色维度，独特干扰物定义为引导强度较低的形状维度，即对以往研究的定义维度反转后，统计规则的作用是否还会存在尚不明确，不同的目标和干扰物维度是否会对统计规则作用产生混淆仍需要实验证实。

如果的确存在定义维度的影响，那么可以进一步将目标和干扰物的定义维度统一来平衡注意引导强度对统计规则的影响。如 Kim 等（2023）将目标和干扰物定义为统一维度，目标为特定形状（正或倒五边形），独特干扰物也定义为另一不同的形状（正或倒三角形）。结果发现，对高概率独特干扰物产生了更强的抑制。然而，该研究只考察了形状维度，没有直接和以往研究常用的颜色维度进行直接对比。Glavan 等（2020）采用系统析因技术（Systems Factorial Technology），证明颜色和形状的维度信息可以并行地引导注意力，这两种信息的处理在时间上是分开的。而且形状和颜色引导注意的神经通路也不相同，基于颜色的注意激活背外侧枕叶皮质（dLO）中的双侧纹外皮质，而基于形状的注意激活海马旁回（PhG）以及颞上沟（STS）周围的颞叶皮层（Clark et al., 1997；Corbetta et al., 1990；Wei et al., 2023）。因此，在 Kim 等（2023）的基础上，为避免由于定义维度不同导致的注意引导强度的差异，

采用统一的维度来定义目标和干扰物，同时考察形状和颜色维度的统计规则作用差异，能够为两个维度的注意引导通路提供更多的证据。

为了考察目标和干扰物的定义维度对基于干扰物特征的统计规则的影响，本研究通过 3 个实验来进行逐步地探讨。实验 1 将目标（形状）和独特干扰物（颜色）的维度设定为和前人研究一致，以此来验证统计规则对注意选择的影响，即当独特干扰物是高概率颜色时，对其的注意捕获减低，目标识别的表现更好（Failing et al., 2019；Stilwell et al., 2019；Vatterott et al., 2018）。证明基于干扰物颜色特征的统计规则在跨维度条件下会对注意选择产生影响。实验 2 将目标（颜色）和独特干扰物（形状）的维度进行反转，如果维度的引导差异存在，那么此时统计规则对注意选择的影响也会发生转变。在实验 1 和实验 2 的基础上，实验 3 将目标和干扰物统一定义为颜色或形状，直接比较形状和颜色维度的统计规则对注意选择影响的差异。如果同维度干扰物特征统计规则会影响注意选择，则相比于低概率干扰物，高概率干扰物更容易被抑制，目标识别更好。此外，基于颜色维度对注意的“绝对引导属性”，预期颜色维度下统计规则对注意选择的影响更强。

2 实验 1：目标定义形状分心物颜色凸显时统计规则的作用

2.1 方法

2.1.1 被试

经 G*Power3.1.9.7 软件计算（effectsizef = 0.25，errorprob = 0.05，1-β = 0.8）样本量为 29 人。本实验被试为随机招募的 31 名天津某高校在校大学生（15 男，16 女，平均年龄 20.5 ± 1.3 岁），所有被试视力或矫正视力正常。实验开始之前签署知情同意书并在实验结束之后获得一定报酬。实验通过伦理委员会审查。

2.1.2 实验刺激和程序

实验程序使用 E-prime 2.0 编写，刺激呈现在 14 英寸的电脑屏幕上，屏幕分辨率为 1920×1080，刷新频率为 60Hz。被试眼睛与屏幕中心的距离为 65cm。

每个试次流程如下：屏幕中央呈现 100~500ms 的灰色（RGB：102，101，92; 13 cd/m², CIE 色度图位置: x = 0.321, y = 0.34）注视点，之后呈现搜索序列（图 1），搜索序列中包含 4 个刺激，均匀的分布在距离中央 2°的虚拟圆中，每个刺激中会有随机向左或向右偏转 45°的黑色线段（0.3°×0.05°），要求被试既快又准地对线段的方向（左或右）进行按键反应。搜索序列的 4 个刺激包含 1 个目标刺激、2 个非独特干扰物和 1 个独特干扰物。目标刺激随机为正三角形（0.9°×0.9°）或菱形（1°×1°），在整个实验中保持不变。非独特干扰物为灰色圆形（直径 0.9°；RGB:102，101，92; 13 cd/m², CIE 色度图位置: x = 0.321, y = 0.34）。独特干扰物随机为红色（RGB: 205，0，0; 13 cd/m2 , CIE 色度图位置: x = 0.64, y = 0.33）或绿色（RGB: 0，118，0; 13 cd/m2 , CIE 色度图位置: x = 0.300, y = 0.600），并按照统计规则分为高概率颜色干扰物（72%）、低概率颜色干扰物（12%）和不呈现（16%）三种情况，例如，目标为菱

形时，高概率干扰物可能为绿色，低概率干扰物则可能为红色，在被试间平衡。实验采用单因素三水平（独特干扰物类型：不呈现、高概率颜色、低概率颜色）被试内设计，因变量为不同条件下的反应时和正确率。被试的任务反应窗口为 800 ms，整个试次的时间固定为 1500ms。实验正式开始前练习 20 个试次，正式实验包含 600 个试次，其中 96 个试次不呈现独特干扰物，432 个试次呈现高概率独特干扰物，72 个试次呈现低概率独特干扰物，总时长约 15 分钟。

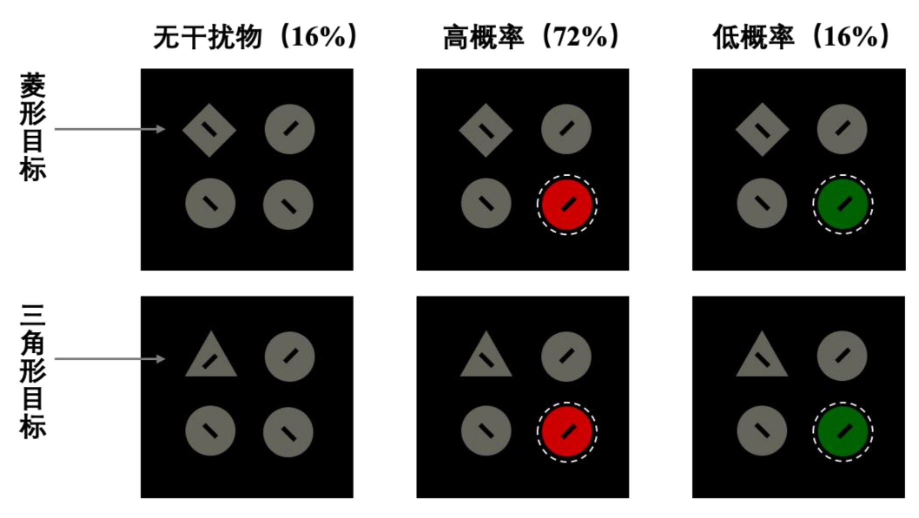


图 1 实验 1 搜索屏，被试的任务是找到特定形状（菱形或三角形），并对其中包含的线段做出反应。高、低概率的干扰物则随机为红色或绿色，被试间平衡。

2.2 结果

剔除错误试次（7.38%）及反应时在 3 个标准差以外的试次（1.03%）。对每个被试剩余有效试次的平均反应时进行重复测量方差分析（独特干扰物类型：不呈现、高概率颜色、低概率颜色）。结果如图 2 所示，独特干扰物类型主效应显著，F（2, 60）= 20.08, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.401$。多重比较结果显示，独特干扰物不呈现条件被试的反应时（587 ± 10ms）和高概率条件的反应时（691 ± 10ms）无显著差异，$p = 0.074$。不呈现条件（587 ± 10ms）和高概率条件被试的反应时（691 ± 10ms）均显著快于低概率条件的反应时（605 ± 10ms），$ps < 0.001$。说明基于干扰物颜色特征的统计规则会影响视觉选择性注意。相比于低概率颜色来说，高概率颜色独特干扰物受到了更多的抑制，注意捕获效应减小。

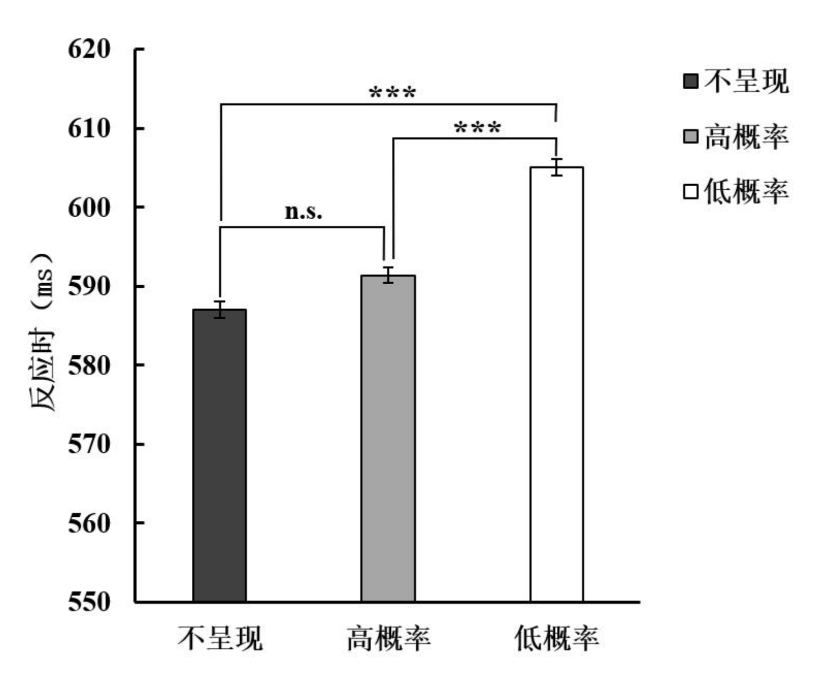


图 2 实验 1 中，当目标定义为形状维度，干扰物定义为颜色维度时，不同统计规则条件下目标识别的反应时，误差线为标准误差。

注：***$p < 0.001$, **$p < 0.01$, *$p < 0.05$, n.s. $p > 0.05$

为考察对干扰物的抑制能力随着时间进程的变化，将所有试次按照实验进程的时间顺序分成 6 组，进行 3（独特干扰物类型：不呈现、高概率颜色、低概率颜色）×6（时间进程：1 组、2 组、3 组、4 组、5 组、6 组）重复测量方差分析。结果（图 3）发现，时间进程主效应不显著，F（5, 150） = 1.79, $p = 0.119$。随着实验的进行，反应速度之间无显著差异。独特干扰物呈现条件主效应显著，F（2, 60） = 19.77, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.397$。不呈现条件下的反应时显著快于低概率条件（$p < 0.001$），高概率条件的反应时显著快于低概率条件（$p < 0.001$），不呈现条件和高概率条件的反应时无显著差异（$p = 0.096$）。说明了基于干扰物形状特征的统计规则会影响视觉选择性注意。相比于低概率条件来说，高概率条件下独特干扰物受到了抑制，注意捕获效应减小。两者的交互作用不显著，F（10, 300） = 0.84，$p = 0.548$。交互作用的贝叶斯因子 $BF_{10} = 0.016$。BF 值小于 0.03，这是较强的证据支持了零假设 (Wagenmakers et al., 2018), 即不同时间段下，不同独特干扰物呈现条件无显著差异。这些结果说明，统计规则的学习并没有随着实验时间发生改变，被试在第一段时间开始就学会很快学会了干扰物特征的统计规则。

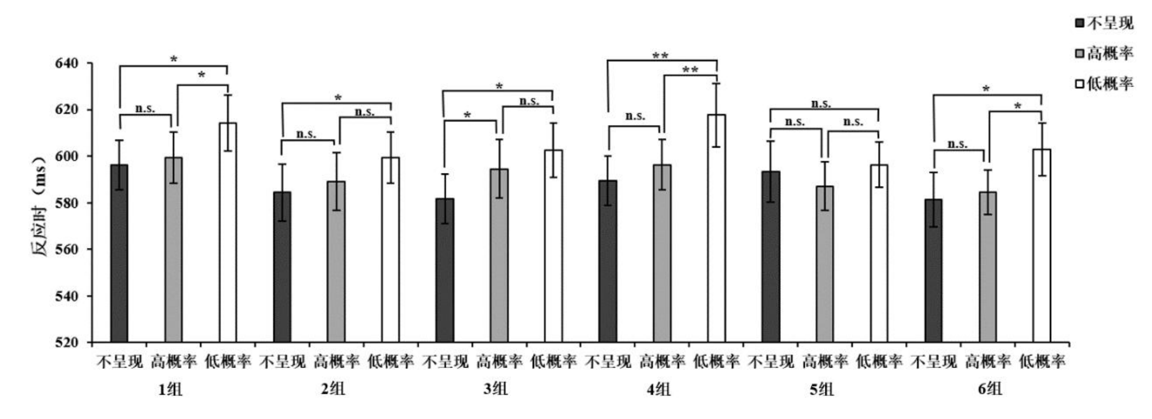


图 3 实验 1 中，当目标定义为形状维度，干扰物定义为颜色维度时，不同独特干扰物呈现条件的反应时随着时间进程的结果。

实验 1 的结果重复了以往研究结果，证实了基于干扰物颜色特征的统计规则会对注意选择产生影响（Failing et al., 2019; Stilwell et al., 2019; Vatterott et al., 2018）。然而，如果定义维度发生反转，目标由对注意有“绝对引导属性”的维度（颜色）定义，独特干扰物由对注意有“相对引导属性”的维度（形状）定义，基于干扰物形状特征的统计规则是否仍会影响注意选择？因此，在实验 2 中将目标定义为颜色维度，改变形状独特干扰物特征的统计规则，以此考察目标和干扰物的定义维度反转后对统计规则作用的影响。

3 实验 2：目标定义颜色分心物形状凸显时统计规则的作用

3.1 方法

3.1.1 被试

经 G*Power3.1.9.7 软件计算（effectsizef = 0.25，errorprob = 0.05，1-β = 0.8）样本量为 29 人。本实验被试为随机招募的 31 名天津某高校在校大学生（15 男，16 女，平均年龄 20.5 ± 1.3 岁），所有被试视力正常或矫正视力正常。实验开始之前签署知情同意书并在实验结束之后获得报酬。实验通过伦理委员会审查。

3.1.2 实验刺激和程序

采用单因素三水平（独特干扰物类型：不呈现 vs. 高概率形状 vs. 低概率形状）被试内设计。实验设备和实验流程同实验 1。与实验 1 不同的是，搜索序列（图 4）的 4 个刺激包含 1 个目标刺激、2 个非独特干扰物和 1 个独特干扰物。目标刺激随机为红色（RGB: 205，0，0; 13 cd/m2 , CIE 色度图位置: x = 0.64, y = 0.33）或绿色（RGB: 0，118，0; 13 cd/m2 , CIE 色度图位置: x = 0.300, y = 0.600），在整个实验中保持不变。独特干扰物随机为正三角形（0.9°×0.9°）、菱形（1°×1°）

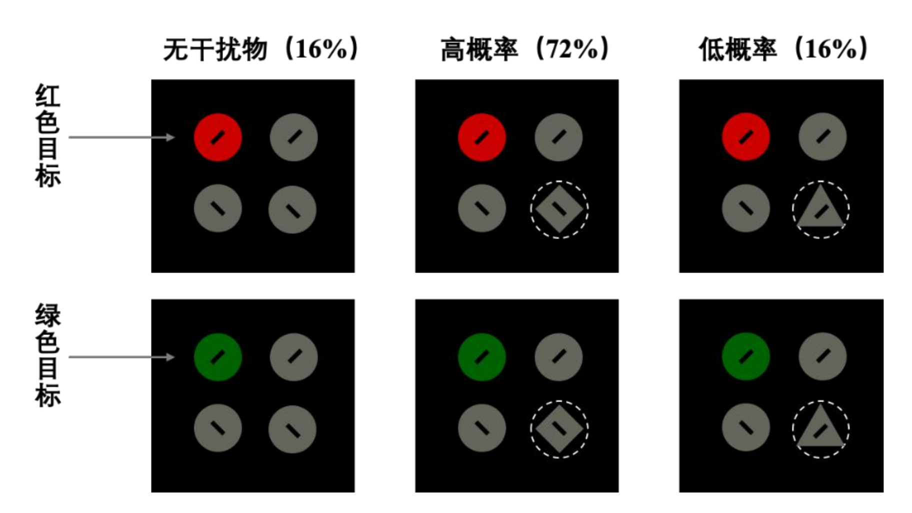


图 4 实验 2 搜索屏，被试的任务是找到特定颜色（红色或绿色），并对其中包含的线段做出反应。高、低概率的干扰物则随机为菱形或三角形，被试间平衡。

3.2 结果

剔除错误试次（6.18%）及反应时在 3 个标准差以外的试次（1.13%）。对每个被试剩余有效试次的平均反应时进行重复测量方差分析（独特干扰物类型：不呈现、高概率颜色、低概率颜色）。结果如图 5 所示，独特干扰物类型主效应不显著，$F(2, 60) = 1.81, p = 0.172$。$BF_{10} = 0.398$，支持了零假设，即不同干扰物类型的反应时无显著差异。说明基于干扰物形状特征的统计规则不会影响视觉选择性注意。

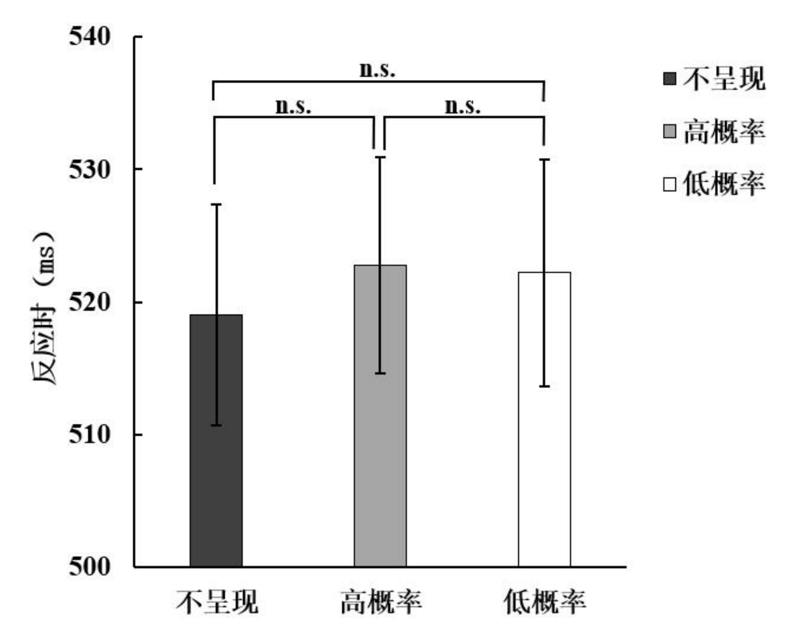


图 5 实验 2 中，当目标定义为颜色维度，干扰物定义为形状维度时，不同统计规则条件下目标识别的反应时，误差线为标准误差。

为考察对干扰物的抑制能力随着时间进程的变化，将所有试次按照实验进程的时间顺序分成 6 组，进行 3（独特干扰物类型：不呈现、高概率形状、低概率形状）×6（时间进程：

1 组、2 组、3 组、4 组、5 组、6 组）重复测量方差分析。结果发现（图 6），时间进程主效应显著，F（5, 150） = 2.88, p = 0.016。η^2 = 0.087。随着实验的进行，前三组的反应速度无显著差异(ps > 0.05)，第 4 组、第 5 组的反应时速度逐渐变慢，都显著慢于第 1 组(ps < 0.05)。独特干扰物呈现条件主效应不显著，F（2, 60） = 2.42, p = 0.098。两者的交互作用不显著，F（10, 300） = 1.17, p = 0.323。进一步简单效应分析，实验刚开始时，第 1、3、5、6 组干扰物不同呈现条件之间无显著差异（ps > 0.05）。第 2 组时，不呈现条件的反应时显著快于高概率条件（p = 0.028）和低概率条件（p = 0.001），第 4 组时，不呈现条件的反应时显著快于高概率条件（p = 0.004）。表明在中间的时间段，干扰物呈现时，曾短暂地捕获注意，但高低概率之间在时间全程都没有显著差异。这些结果表明，被试经过长时间的学习后，随着任务的进行对干扰物不再捕获注意，但未受到统计规则的显著影响。

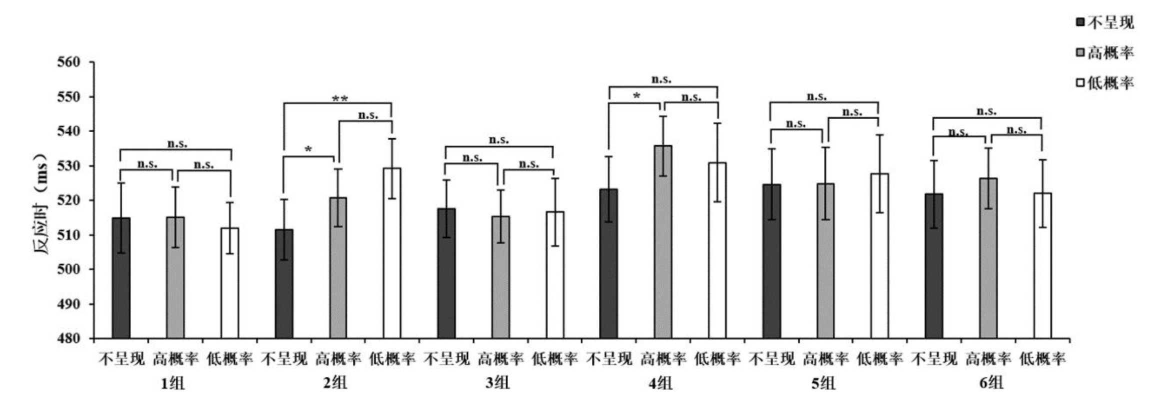


图 6 实验 2 中，当目标定义为颜色维度，干扰物定义为形状维度时，不同独特干扰物呈现条件的反应时随着时间进程的结果。

在实验 2 中，维度反转后，基于干扰物形状特征的统计规则没有影响注意选择。说明目标和凸显分心物的维度的确对统计规则的作用产生了影响，是需要进行控制的重要影响因素。因此，实验 3 将目标和干扰物同维度定义（统一定义为颜色或形状），在控制了目标和凸显分心物的维度的基础上，直接比较形状和颜色两个维度的统计规则的作用差异。

4 实验 3：同维度定义的干扰物特征统计规则对注意选择的影响

4.1 方法

4.1.1 被试

经 Morepwer 6.0.4 软件计算（η_p^2=0.15，α=0.05，1-β=0.8）样本量为 30 人。本实验被试为随机招募的 31 名天津某高校在校大学生（13 男，18 女，平均年龄 20.2 ± 1.3 岁），所有被试视力正常或矫正视力正常。实验开始之前签署知情同意书并在实验结束之后获得报酬。实验通过伦理委员会审查。

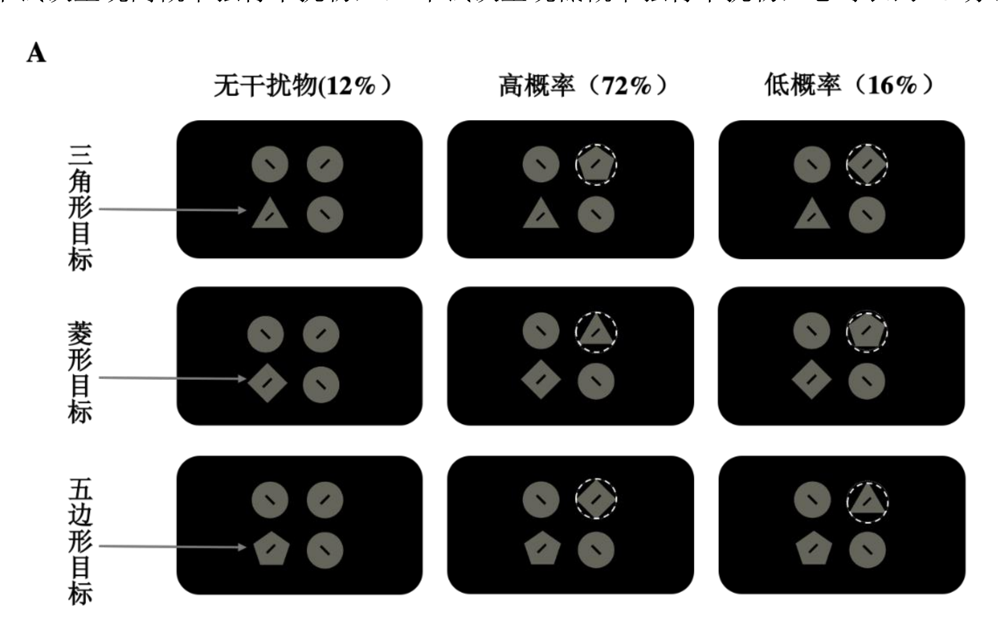
4.1.2 实验刺激和程序

实验设备和实验流程同实验 2。与实验 2 不同的是，实验 3 采用（搜索维度：形状 vs. 颜色）×3（独特干扰物呈现条件：不呈现 vs. 高概率呈现 vs. 低概率呈现）被试内设计，包括形状组块和颜色组块。因变量为不同条件下的反应时和正确率。

在形状组块中（图 7A），所有刺激颜色均为灰色（RGB:102，101，92; 13 cd/m², CIE 色度图位置: x = 0.321, y = 0.34）。非独特干扰物为圆形（直径 0.9°）。目标刺激可能为正三角形（0.9°×0.9°）、菱形（1°×1°）或正五边形（1°×1°）。高概率干扰物低和概率干扰物则可能为其他两种形状。例如，目标为菱形时，高概率干扰物可能为三角形，低概率干扰物则可能为五边形。目标刺激、高低概率干扰物的形状在整个组块中固定，在被试间平衡。

在颜色组块中（图 7B），所有刺激形状均为圆形，非独特干扰物为灰色（RGB:102，101，92; 13 cd/m², CIE 色度图位置: x = 0.321, y = 0.34），目标随机为红色（RGB: 205，0，0; 13 cd/m2 , CIE 色度图位置: x = 0.64, y = 0.33）或绿色（RGB: 0，118，0; 13 cd/m2 , CIE 色度图位置: x = 0.300, y = 0.600）或蓝色（RGB: 0，80，255; 13 cd/m2 , CIE 色度图位置: x = 0.161, y = 0.100）。高概率干扰物低和概率干扰物则可能为其他两种颜色，例如，目标为绿色时，高概率干扰物可能为蓝色，低概率干扰物则可能为红色。目标刺激、高低概率干扰物的颜色在整个组块中固定，在被试间平衡。

被试的任务反应窗口为 1500 ms，整个试次的时间固定为 2200ms。每个组块开始前练习 20 个试次，正式实验中两个组块各包含 600 个试次，其中 96 个试次不呈现独特干扰物，432 个试次呈现高概率独特干扰物，72 个试次呈现低概率独特干扰物，总时长约 45 分钟。



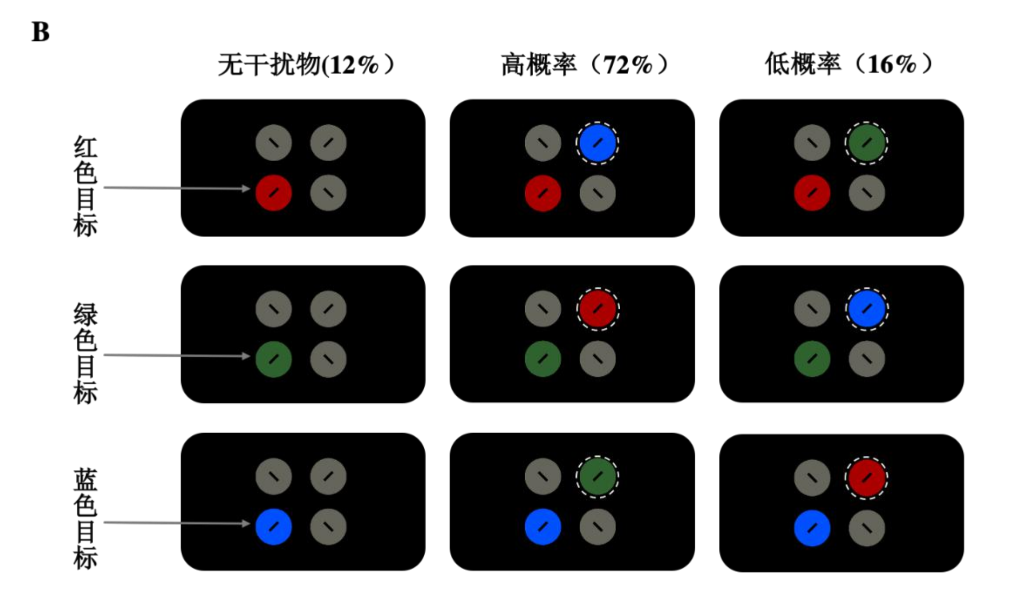


图 7 实验 3 的搜索屏。形状组快中（A），目标可能为三角形、菱形、五边形，高、低概率的干扰物则随机为另外两种形状，被试间平衡；颜色组块中（B），目标可能为红色、绿色、蓝色，高、低概率干扰物则随机为另外两种颜色，被试间平衡。

4.2 结果

剔除错误试次（3.8%）及反应时在 3 个标准差以外的试次（1.24%）。对不同条件下的正确率进行 2（搜索维度：形状、颜色）×3（独特干扰物呈现条件：不呈现、高概率呈现、低概率呈现）的重复测量方差分析，结果显示搜索维度主效应显著，$F(1, 30)= 4.389$, $p = 0.045$, $\eta^2 = 0.128$。颜色维度的正确率（96.9 ± 0.6%）显著高于形状维度（95.9 ± 0.7%），表明颜色维度的注意选择具有优势。独特干扰物呈现条件的主效应（F（2, 60）= 0.64, $p = 0.487$, $\eta^2 = 0.021$）以及两者的交互效应（F（2, 60）= 1.59, $p = 0.217$）均不显著。

对每个被试有效试次的平均反应时进行 2（搜索维度：形状、颜色）×3（独特干扰物呈现条件：不呈现、高概率呈现、低概率呈现）的重复测量方差分析，结果发现，搜索维度主效应显著，F（1, 30） = 182.14, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.859$，搜索颜色维度的反应时（569 ± 10ms）显著快于形状维度（735 ± 15ms）。说明相对于形状维度，颜色的注意选择具有优势。独特干扰物呈现条件主效应显著，F（2, 60）= 41.74, $p < 0.001$, η^2=0.582。独特干扰物不呈现条件被试的反应时（631 ± 10ms）显著快于高概率条件（656 ± 12ms）和低概率条件（669 ± 13ms），$ps < 0.001$。高概率条件被试的反应时（656 ± 12ms）显著快于低概率条件（669 ± 13ms），$p = 0.005$。说明基于干扰物特征的统计规则会影响视觉选择性注意。相比于低概率条件来说，高概率条件下独特干扰物受到了抑制，注意捕获效应减小。

更重要的是，搜索维度和独特干扰物呈现条件交互作用显著，F(2, 60）= 21.35, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.416$。进一步简单效应分析（图 8）发现，当搜索形状维度时，独特干扰物不呈现条件

下被试的反应时（699 ± 80ms）显著快于高概率条件（747 ± 87ms）和低概率条件（759 ± 92ms），*ps* < 0.001；说明形状维度下，独特干扰物呈现时捕获了注意。独特干扰物高概率条件被试的反应时（747 ± 87ms）显著快于低概率条件被试的反应时（759 ± 92ms），$p = 0.022$。即高概率条件的注意捕获更少。高概率呈现的形状特征一定程度抑制了注意捕获。当搜索颜色维度时，独特干扰物不呈现条件被试的反应时（563 ±57ms）与高概率条件（565 ± 57ms）无显著差异，$p = 0.403$；不呈现条件被试的反应时（563 ± 57ms）显著快于低概率条件（580 ± 63ms），$p = 0.013$；高概率条件被试的反应时（565 ± 57ms）同样显著快于低概率条件 （580 ± 63ms），$p = 0.005$。说明颜色维度下，低概率独特干扰物呈现时捕获了注意，但高概率独特干扰物呈现时的注意捕获几乎消失。

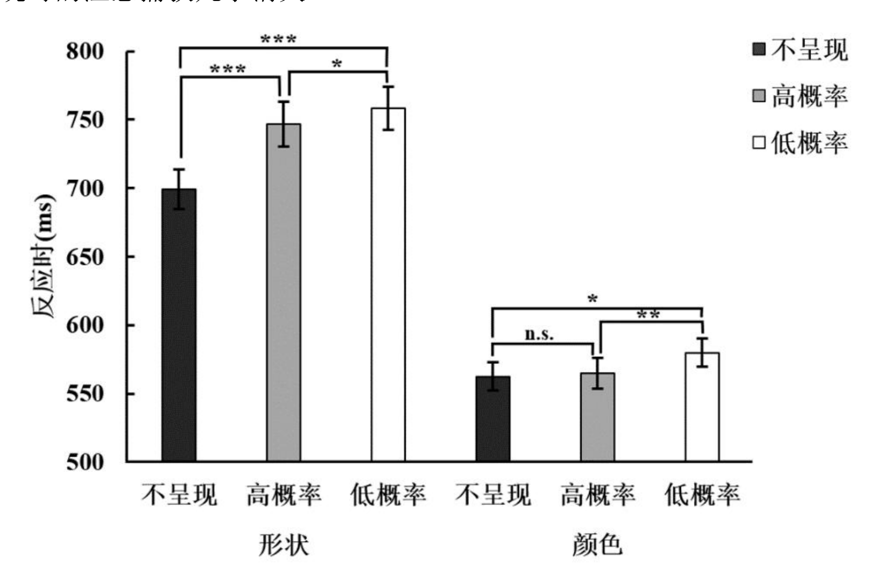


图 8 实验 3 中，当定义维度相同时，形状和颜色统计规则条件下目标识别反应时，误差线为标准误差。

为考察对干扰物的抑制能力随着时间进程的变化，将所有试次按照实验进程的时间顺序分成 6 组，对形状维度和颜色维度的反应时分别进行 3（独特干扰物呈现条件：不呈现、高概率呈现、低概率呈现）×6（时间进程：1 组、2 组、3 组、4 组、5 组、6 组）重复测量方差分析。结果发现，搜索形状维度时（图 9A），时间进程主效应显著，$F(5, 150) = 5.57$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.157$。随着实验的进行，反应速度逐渐变快，第 4 组、第 5 组、第 6 组的反应时都显著快于前 3 组（*ps* < 0.05）。独特干扰物呈现条件主效应显著，$F(2, 60) = 46.72$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.609$。不呈现条件下的反应时显著快于高概率条件（$p < 0.001$）和低概率条件（$p < 0.001$），高概率条件的反应时显著快于低概率条件（$p = 0.033$），说明了基于干扰物形状特征的统计规则会影响视觉选择性注意。相比于低概率条件来说，高概率条件下独特干扰物受到了抑制，注意捕获效应减小。两者的交互作用不显著，$F(10, 300) = 0.94$, $p = 0.468$。交互作用的贝叶斯因子 $BF_{10} = 0.017$。BF 值小于 0.03，较强的支持了零假设，即不同时间段下，不同独特干扰物呈现条件无显著差异。这些结果说明，在形状维度，统计规则的学习并没有

随着实验时间发生改变。

搜索颜色维度时（图 9B），时间进程主效应显著，F（5, 150） = 2.40, $p = 0.04$, $\eta^2 = 0.074$。随着实验的进行，前 3 组时间，被试的反应时无显著差异，第 4 组和第 5 组的反应显著快于前 3 组（$ps < 0.05$）。独特干扰物呈现条件主效应显著，F（2, 60） = 46.72, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.609$。不呈现条件下的反应时显著快于高概率条件（$p < 0.001$）和低概率条件（$p < 0.001$），高概率条件的反应时显著快于低概率条件（$p = 0.033$），说明了基于干扰物颜色特征的统计规则会影响视觉选择性注意。相比于低概率条件来说，高概率条件下独特干扰物受到了抑制，注意捕获效应减小。交互作用显著，F（3, 300） = 2.64, $p = 0.016$, $\eta^2 = 0.081$。进一步简单效应检验发现，实验刚开始时，第 1 组和第 2 组的干扰物不同呈现条件之间无显著差异（$p = 0.694$，$p = 0.309$），说明被试还没有明显受到统计规则的影响。第 3 组时，不呈现条件的反应时显著快于低概率条件，$p = 0.035$，高概率条件显著快于低概率条件，$p = 0.001$。4 组和 3 组结果一致，不呈现条件显著快于低概率条件，$p = 0.005$，高概率条件显著快于低概率条件，$p = 0.037$。5 组时，独特干扰物不呈现的反应时显著快于高概率条件，$p = 0.046$；不呈现条件也显著快于低概率条件，$p = 0.001$。6 组时，不呈现条件显著快于低概率条件，$p = 0.001$；高概率条件显著快于低概率条件，$p = 0.007$。这些结果表明，被试经过前两组时间的学习后，随着任务的进行被试逐渐对低概率独特干扰物产生捕获（反应时增长），对高概率独特干扰物则没有捕获（表现和不呈现相似）。

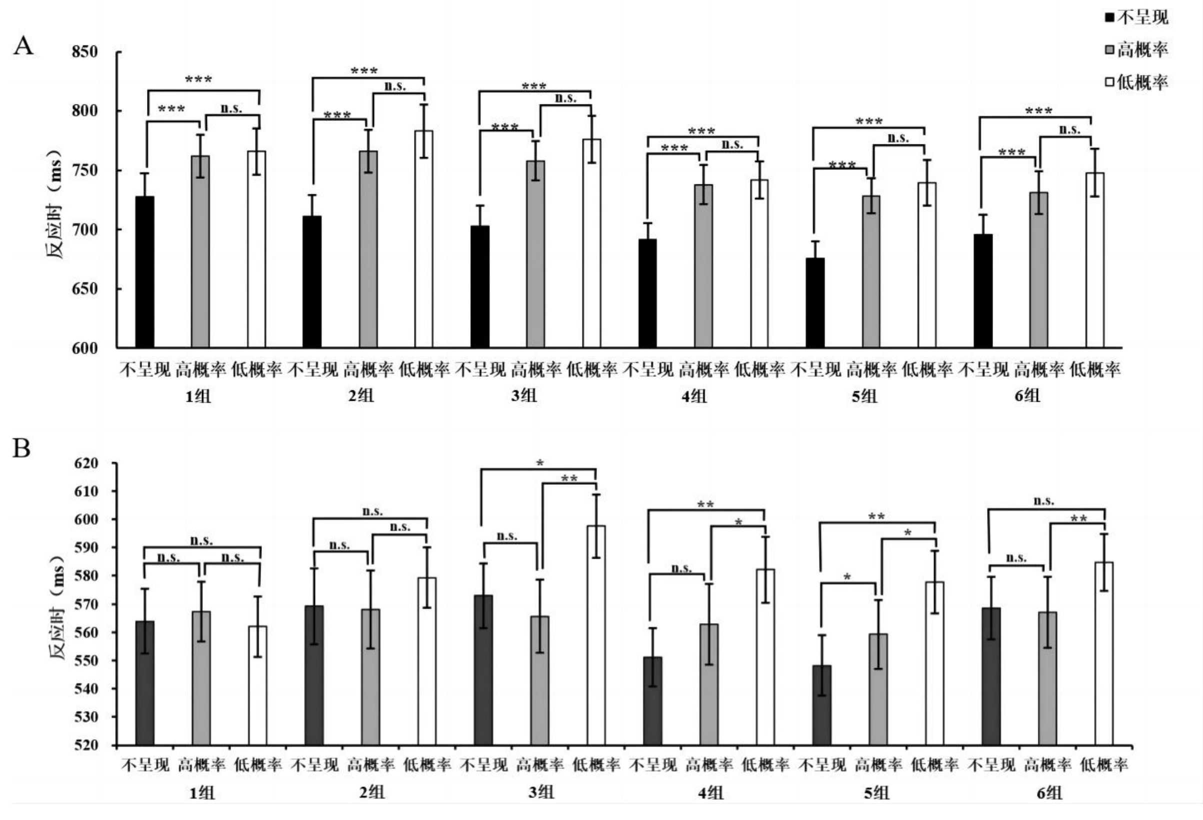


图 8 实验 3 中，形状（A）和颜色（B）维度下不同独特干扰物呈现条件的反应时随着时间进程的结果。

4 讨论

为了排除以往研究中目标和干扰物定义维度差异对干扰物统计规则作用的混淆，本研究通过 3 个实验逐步进行了验证和进一步探索。实验 1 的目标和干扰物定义维度和以往研究相同，即目标为形状，干扰物为凸显的颜色，结果重复验证了以往研究，发现当高概率颜色的干扰物出现时，对目标选择的反应更快，说明个体能够更好地抑制对高概率干扰物的加工，即基于干扰物颜色特征的统计规则会对注意选择产生影响。然而，当实验 2 将定义维度反转，即目标为颜色，干扰物凸显的形状时，则没有发现统计规则的作用。这也证实了目标与干扰物的定义维度会对统计规则的作用产生影响。进一步地，实验 3 避免了不同维度的作用强度差异，在统一目标和干扰物定义维度的前提下，同时考察了形状和颜色维度的统计规则对目标选择和干扰物抑制的影响。结果发现，个体能够更好地抑制对高概率干扰物的加工。更重要的是，搜索形状时，不呈现条件的反应时显著快于高概率条件，而在搜索颜色时两者无显著差异。这表明，当统计规则作用于引导强度较高的维度（颜色）时，统计规则引起的抑制作用也更强。研究不仅解决了目标和干扰物定义维度不同引起的注意引导权重混淆，还直接对比了统计规则在颜色和形状维度下的作用差异，发现了统计规则和搜索维度的交互影响，扩展了历史经验对当前注意的影响，为视觉搜索任务如何优化搜索效率提供了新的证据。

研究关注了影响统计规则的关键因素，即目标和干扰物的定义维度。实验 1 和实验 2 的结果也表明定义维度会对统计规则的作用产生干扰。在单例搜索模式下，相比于干扰物的形状特征，目标的颜色被认为对注意有“绝对引导属性”（Wolfe & Horowitz, 2017）。在注意选择中更具优势（Theeuwes, 1992；Treisman & Gelade, 1980）。因此，当被试寻找颜色目标时，形状干扰物对颜色目标的影响很小，个体在不学习形状干扰物的特征统计规则的前提下，仍能够迅速找到目标（张帆等，2021；Failing, Wang, et al., 2019；Stilwell et al., 2019；Vatterott et al., 2018）。因此，统一目标和干扰物的定义维度非常重要。研究关注了影响统计规则的关键因素，并对以往研究常用的但又亟需避免的定义维度提供了重要证据，为未来统计规则的研究给出了更加明确的建议。

当统一了目标和干扰物的定义维度后（实验 3），基于干扰物特征的统计规则仍然能够引导注意。该结果扩展了以往的研究结果，发现当避免了目标和干扰物维度对注意的引导强度不同的混淆时，干扰物特征的统计规则在颜色和形状维度下仍然可以影响注意选择，表明统计规则对注意选择的影响是广泛且稳定的，不受目标和干扰物定义维度一致与否的影响。研究结果支持了统计规则在视觉搜索中的核心作用，即通过学习和利用统计规则，个体能够预测干扰物出现的特征，当学习到某个特征与干扰物高度相关时，更倾向于不关注这些特征，从而优化注意分配，提高搜索效率，体现了视觉注意系统的灵活性和适应性（Ferrante et al., 2018；Failing, Wang, et al., 2019；Stilwell et al., 2019）。

此外，更重要的是，基于干扰物的统计规则的作用主要是减少甚至抵消对干扰物的注意

捕获，并且这种相对抑制作用受到颜色和形状维度的调节。具体来说，当统计规则作用于引导强度较高的维度时，其引起的抑制作用也更强：一方面，形状维度下的高概率条件比不呈现条件的反应时更慢，基于干扰物形状维度的统计规则减少了干扰物的注意捕获，但仍表现为注意捕获。这一结果与 Kim 等（2023）和 Tsai 等（2023）的结果一致，共同支持了维度加权理论（Dimension-Weighting Account，DWA），即当寻找某一特定维度的突出目标时不能轻易忽略同一维度中突出的干扰物（Liesefeld et al., 2019）。传统的注意捕获理论也认为，显著的刺激会自动捕获注意，导致反应时的延长（Theeuwes, 1992）。即使个体对统计规则有深入的学习和认识，他们仍然可能无法完全消除自下而上的捕获效应（Failing et al., 2019；Ferrante et al., 2018；Stilwell et al., 2019）。如 Stilwell 等（2019）采用经典的额外单例范式，要求被试搜索特定形状的刺激，并忽略一个颜色独特的干扰物，结果表明，高概率条件的反应时总是显著慢于不呈现条件，注意捕获效应仍然存在。因此，统计规则对高概率形状干扰物的抑制作用较弱，干扰物仍然表现出符合维度加权理论和传统注意捕获理论的注意捕获现象。

另一方面，令人意外的是，与形状维度不同，颜色维度下，高概率条件与不呈现条件之间没有显著差异。即高概率条件干扰物不再捕获注意，基于干扰物颜色维度的统计规则抵消了干扰物的注意捕获。以往只在特征搜索模式下发现了统计规则对注意捕获效应抵消的现象，如 Wang 和 Theeuwes（2018c）发现，当干扰物出现在高概率位置时，即统计规则基于空间位置时，注意捕获效应被抵消。然而，本研究在非特征搜索模式（单例搜索模式）下发现了基于特征（如颜色）的统计规则也能够抵消注意捕获效应，这表明个体的注意分配并非完全受自下而上的外部刺激的影响和自上而下目标导向的支配，而是受到其对特征先验知识和经验的影响，对现有的注意捕获理论提出了挑战。颜色和形状维度统计规则的相对抑制作用不同的原因可能是，颜色刺激的对比度和辨别性更高，在时间上也先于形状感知，被试更容易识别和加工颜色信息并以此来分配注意,以减少对颜色干扰物的关注（Clifford et al., 2003；Rentzeperis et al., 2014; White et al., 2014）。且形状通常被认为是比颜色更复杂的特征，相比形状维度，颜色维度对注意的引导效力（effectiveness）更强（Wolfe & Horowitz, 2017；Huang, 2020）。因此，颜色维度统计学习带来的抑制作用更强。此外，不同维度信息的处理机制不同也可能是抑制作用不同的原因：颜色信息的处理主要依赖于腹侧通路（ventral stream），特别是 V4 和 IT（下颞叶）区域。这些区域对颜色信息的敏感度较高，能够迅速识别和处理颜色刺激（Conway, 2009），而形状信息的处理不仅依赖腹侧通路还依赖于背侧通路（dorsal stream）（Collins et al., 2019；Freud et al., 2013）。研究结果令人惊喜地发现了不同维度对统计规则作用的调节，为维度特异性提供了证据，未来研究可以进一步探讨统计规则在不同任务和更现实环境下的适用性，以及其他维度在注意选择中的作用和不同维度之间的交互作用。

最后，研究还发现，对形状和颜色维度的统计规则学习在时间进程上存在差异。对于颜色维度，随着时间的进行，统计规则对注意选择的影响逐渐显现，前两个时间段下，不同条

件的反应时无显著差异，从第三个时间段开始，高概率条件的反应时显著快于低概率条件。这与前人研究结果一致（Gaspelin & Luck, 2018；Vatterott & Vecera, 2012）。在学习的初始阶段，注意更多是刺激驱动的，随着经验的积累，基于自上而下信息的认知控制完全建立，统计规则的影响逐渐显著（Han & Kim, 2009）。然而，对于形状维度，不同时间段下没有明显习得干扰物统计规则的趋势变化，高低概率条件的反应时在六个时间段下都没有显著差异，只在总体时间下表现出高概率条件的反应时显著快于低概率条件。这可能与工作记忆容量有关，对注意的引导效力（effectiveness）较强的视觉特征，如颜色，可以高精度地存储在视觉工作记忆中，最多可存储约四个刺激（张帆等，2021；Luck & Vogel, 1997）。然而，对于形状特征，即使是两个刺激的存储能力也很差（Sakai, 2005；Salmela et al., 2010）。这意味着，个体可能需要更长的时间来积累和处理足够的信息，以便形成稳定的统计规则（Mu et al., 2024；Salmela et al., 2010）。因此，对形状的低工作记忆容量可能会使观察者更难在较短的段时间内表现出对统计规则的学习。此外，研究中对形状特征的控制主要在简单形状层面，对于复杂形状的考察还需未来进一步研究。

综上所述，本研究揭示了在视觉搜索任务中，目标和干扰物定义的维度一致时，形状和颜色两种维度的统计规则均会对注意选择产生显著影响。且统计规则的影响强度和搜索维度对注意选择有交互影响，当统计规则作用于引导强度较高的维度（颜色）时，其抑制作用更为显著，使干扰物不再捕获注意。研究结果表明，视觉系统可以利用不同维度的规律来优化认知资源的分配，这一发现更好地阐释了之前经验对当前注意的影响，为提高视觉搜索效率提供了重要见解。

参考文献

张帆, 王爱君, & 张明. (2021). 基于干扰物特征的统计规则对注意抑制效应的影响. *心理学报, 53*(6), 10.

Bacon, W. F., & Egeth, H. E. (1994). Overriding stimulus-driven attentional capture. *Perception & Psychophysics*, *55*(5), 485–496.

Broadbent, D. E. (1958). Effect of Noise on an "Intellectual" Task. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *30*(9), 824–827.

Clark, V. P., Parasuraman, R., Keil, K., Kulansky, R., Fannon, S., Maisog, J. Ma., Ungerleider, L. G., & Haxby, J. V. (1997). Selective attention to face identity and color studied with f MRI. *Human Brain Mapping*, *5*(4), 293–297.

Clifford, C. W. G., Arnold, D. H., & Pearson, J. (2003). A paradox of temporal perception revealed by a stimulus oscillating in colour and orientation. *Vision Research*, *43*(21), 2245–2253.

Collins, E., Freud, E., Kainerstorfer, J. M., Cao, J., & Behrmann, M. (2019). Temporal Dynamics of Shape Processing Differentiate Contributions of Dorsal and Ventral Visual Pathways. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *31*(6), 821–836.

Conway, B. R. (2009). Color Vision, Cones, and Color-Coding in the Cortex. *The Neuroscientist*, *15*(3), 274–290.

Corbetta, M., Miezin, F. M., Dobmeyer, S., Shulman, G. L., & Petersen, S. E. (1990). Attentional Modulation of Neural Processing of Shape, Color, and Velocity in Humans. *Science*, *248*(4962), 1556–1559.

Failing, M., Feldmann-Wustefeld, T., Wang, B., Olivers, C., & Theeuwes, J. (2019). Statistical Regularities Induce Spatial as well as Feature-Specific Suppression. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance*, *45*(10), 1291–1303.

Failing, M., & Theeuwes, J. (2018). Selection history: How reward modulates selectivity of visual attention. *Psychonomic Bulletin & Review*, *25*(2), 514–538.

Failing, M., & Theeuwes, J. (2020). More capture, more suppression: Distractor suppression due to statistical regularities is determined by the magnitude of attentional capture. *Psychonomic Bulletin & Review*, *27*(1), 86–95.

Failing, M., Wang, B., & Theeuwes, J. (2019). Spatial suppression due to statistical regularities is driven by distractor suppression not by target activation. *Attention Perception & Psychophysics*, *81*(5), 1405–1414.

Ferrante, O., Patacca, A., Di Caro, V., Della Libera, C., Santandrea, E., & Chelazzi, L. (2018). Altering spatial priority maps via statistical learning of target selection and distractor filtering. *Cortex*, *102*, 67–95.

Freud, E., Ganel, T., & Avidan, G. (2013). Representation of possible and impossible objects in the human visual cortex: Evidence from fMRI adaptation. *NeuroImage*, *64*, 685–692.

Gaspelin, N., & Luck, S. J. (2018). The Role of Inhibition in Avoiding Distraction by Salient Stimuli. *Trends in Cognitive Sciences*, *22*(1), 79–92.

Glavan, J. J., Haggit, J. M., & Houpt, J. W. (2020). Temporal organization of color and shape processing during visual search. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *82*(2), 426–456.

Han, S. W., & Kim, M.-S. (2009). Do the contents of working memory capture attention? Yes, but cognitive control matters. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *35*(5), 1292–1302.

Huang, L. (2020). Space of preattentive shape features. *Journal of Vision*, *20*(4), 10.

Kim, H., Ogden, A., & Anderson, B. A. (2023). Statistical learning of distractor shape modulates attentional capture. *Vision Research*, *202*, 108155.

Lennie, P. (2003). The Cost of Cortical Computation. *Current Biology*, *13*(6), 493–497.

Liesefeld, H. R., Liesefeld, A. M., & Müller, H. J. (2019). Distractor-interference reduction is dimensionally constrained. *Visual Cognition*, *27*(3–4), 247–259.

Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, *390*(6657), 279–281.

Mu, Y., Schubö, A., & Tünnermann, J. (2024). Adapting attentional control settings in a shape-changing environment. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *86*(2), 404–421.

Rentzeperis, I., Nikolaev, A. R., Kiper, D. C., & Van Leeuwen, C. (2014). Distributed processing of color and form in the visual cortex. *Frontiers in Psychology*, *5*.

Sakai, K. (2005). Capacity Limitation in Short-Term Visual Memory for Contour Curvature. *Perception*, *34*(9), 1095–1105.

Salmela, V. R., Mäkelä, T., & Saarinen, J. (2010). *Vision Research*, *50*(6), 623–629.

Stilwell, B. T., Bahle, B., & Vecera, S. P. (2019). Feature-based statistical regularities of distractors modulate attentional capture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *45*(3), 419–433.

Theeuwes, J. (1992). Perceptual selectivity for color and form. *Perception & Psychophysics*, *51*(6), 599–606.

Theeuwes, J. (2019). Goal-driven, stimulus-driven, and history-driven selection. *Current Opinion in Psychology*, *29*, 97–101.

Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, *12*(1), 97–136.

Tsai, S. Y., Nasemann, J., Qiu, N., Töllner, T., Müller, H. J., & Shi, Z. (2023). Little engagement of attention by salient distractors defined in a different dimension or modality to the visual search target. *Psychophysiology, 60*(12), e14375.

Vatterott, D. B., Mozer, M. C., & Vecera, S. P. (2018). Rejecting salient distractors: Generalization from experience. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *80*(2), 485–499.

Vatterott, D. B., & Vecera, S. P. (2012). Experience-dependent attentional tuning of distractor rejection. *Psychonomic Bulletin & Review*, *19*(5), 871–878.

Wang, B., & Theeuwes, J. (2018a). How to inhibit a distractor location? Statistical learning versus active, top-down suppression. *Attention Perception & Psychophysics*, *80*(4), 860–870.

Wang, B., & Theeuwes, J. (2018b). Statistical regularities modulate attentional capture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *44*(1), 13–17.

Wang, B., & Theeuwes, J. (2018c). Statistical regularities modulate attentional capture independent of search strategy. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *80*(7), 1763–1774.

Wei, L., Li, X., Huang, L., Liu, Y., Hu, L., Shen, W., Ding, Q., & Liang, P. (2023). An fMRI study of visual geometric shapes processing. *Frontiers in Neuroscience*, *17*, 1087488.

White, A. L., Lunau, R., & Carrasco, M. (2014). The attentional effects of single cues and color singletons on visual sensitivity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *40*(2), 639–652.

Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2017). Five factors that guide attention in visual search. *Nature Human Behaviour*, *1*(3), 0058.

Color Trumps Shape: The Impact of Statistical Regularities of Same-Dimension Distractor Features on Attentional Selection

Abstract

In visual search tasks, search efficiency improves when distractor feature is fixed, indicating that statistical regularities can enhance attentional selection performance. However, previous studies often used inconsistent feature dimensions for targets and distractors, potentially confounding the effects of statistical regularities with attentional guidance differences derived from distinct dimensions. Color is considered to have "undoubted guiding attributes" for attention, while shape is a relatively weaker guiding feature. This dimensional difference may influence the effectiveness of statistical learning in visual search tasks. This study aimed to investigate the impact of target and distractor dimensions on the efficacy of statistical regularities in visual search tasks, and to examine the influence of statistical regularities on attentional selection across both shape and color dimensions when controlling for consistent dimensional definitions. We hypothesized that statistical regularities would affect attentional selection differently depending on the defining dimension of targets and distractors.

Three experiments were conducted with university students as participants. In Experiment 1, targets were defined by shape and distractors by color, replicating previous studies. Participants searched for a specific shape (e.g., diamond) among non-targets while ignoring a color singleton distractor. Experiment 2 reversed these dimensional definitions, with targets defined by color and distractors by shape. Experiment 3 controlled for consistent dimensional definitions for both targets and distractors, examining the influence of statistical regularities on attentional selection across both shape and color dimensions. In this experiment, participants completed two blocks: one with shape-defined targets and distractors, and another with color-defined targets and distractors. In all experiments, participants performed a visual search task where they had to identify a target among distractors. The probability of distractor features was manipulated (high-probability: 72%, low-probability: 12%, no-distractor: 16%). Response times and accuracy were recorded as dependent variables. The experiments used a within-subjects design, and the order of conditions was counterbalanced across participants.

Experiment 1 found that response times were significantly faster in high-probability distractor conditions (691 ± 10ms) compared to low-probability conditions (605 ± 10ms), confirming the effect of color-based statistical regularities on attentional selection. There was no significant difference between the no-distractor condition (587 ± 10ms) and the high-probability condition, indicating effective suppression of high-probability distractors. Experiment 2 showed no significant effect of shape-based statistical regularities when targets were defined by color, suggesting that the dimensional difference between targets and distractors interferes with statistical learning effects. In Experiment 3, when target and distractor dimensions were unified,

response times to targets were significantly faster in high-probability distractor conditions relative to low-probability conditions for both shape and color dimensions. Importantly, in the color dimension, no significant difference was observed between high-probability (565 ± 57ms) and no-distractor conditions (563 ± 57ms), indicating stronger suppression effects of statistical regularities. Both conditions were significantly faster than the low-probability condition (580 ± 63ms). Conversely, in the shape dimension, response times were slower in high-probability conditions (747 ± 87ms) compared to no-distractor conditions (699 ± 80ms), suggesting weaker suppression effects and persistent attentional capture. Both conditions were significantly faster than the low-probability condition (759 ± 92ms). Analysis of learning trajectories revealed that color-based statistical learning emerged earlier and was more stable compared to shape-based learning.

This study clarified the confounds introduced by inconsistent stimulus-defining dimensions in previous research on statistical regularities in visual search. This study highlights how the visual system optimizes cognitive resource allocation through both statistical regularities and search dimensions, thereby enhancing search efficiency. The differential effects observed between color and shape dimensions suggest that statistical learning may be more effective for features with stronger attentional guidance properties, such as color. These results contribute to our understanding of how prior experience shapes current attentional processes and provide insights for improving visual search efficiency in various applied settings, such as optimizing educational environments or designing more effective visual displays. Future research could explore the applicability of these findings to more complex real-world scenarios and investigate the interaction between different feature dimensions in statistical learning processes.

Keywords statistical regularities; attentional selection; attentional suppression; color; shape